

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ОБОЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ ПАО «МГОК» ПРИ ИХ ОФЛЮСОВАНИИ ДОЛОМИТОМ

Аннотация

Оксид магния является важным составляющим доменного шлака, обеспечивая его стабильность и жидкоподвижность в широком интервале температуры [1, 2]. Поэтому производство офлюсованного магнезильного сырья является обязательным условием высокопроизводительной доменной плавки на большинстве предприятий мира. Для АО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк) задача использования магнезиальных флюсов является актуальной, ее решение достигается добавками в агломерат сидеритовой руды Бакальского рудоуправления, с высоким содержанием MgO в составе пустой породы [3, 4]. Существующая перспектива перехода на шихту с 95 % содержанием окатышей ПАО «МГОК» делает невозможным реализацию этого варианта ввода MgO в доменную шихту [4]. Поэтому налаживание производства офлюсованных магнезиальных окатышей в ПАО «МГОК» чрезвычайно важно для АО «Уральская Сталь».

Ключевые слова: магнезиальные окатыши, основность, металлургические свойства.

Abstract

Magnesium oxide is a key component of a blast furnace slag, which ensures slag consistent physical properties and fluidity in a wide range of temperatures [1, 2]. Therefore, the prerequisite for high output of a blast furnace worldwide is the production of a fluxed magnesial BF feedstock. For AO «Uralskaya Stal» (Public Company Ural Steel), City of Novotroitsk, the necessity of applying the magnesial fluxes is a relevant objective. This objective is being fulfilled by adding siderite ore of Bakalskiy mine, containing a considerable amount of MgO in the gangue, to the sinter [3, 4]. The near-term perspective of transition to the BF feed with 95 % of pellets from PAO «MGOK» (Public Company Mikhailovskiy Iron Ore Dressing Plant) undermines the initiative of adding the MgO to the blast furnace burden [4]. For this reason, establishing of fluxed magnesial pellets' production at PAO «MGOK» is of utmost importance to AO «Uralskaya Stal».

Key words: magnesial pellets, basicity, metallurgical properties.

Введение. Производство магнезиальных окатышей является актуальным направлением развития горнорудных предприятий, особенно в контексте ужесточения экологических норм и снижения объемов производства агломерата. Повышение качества окатышей является важной задачей также и с позиций конкурентной борьбы в условиях роста предложения на рынке железорудного сырья при ограниченном росте производства стали [5].

Реализация этого пути на действующем производстве ПАО «МГОК» требует адаптации технологического процесса к новым условиям шихтования. Выбор технических решений, а, следовательно, и объем финансирования,

необходимый для их внедрения, определится исходя из особенностей протекания физико-химических процессов при производстве окатышей при различных вариантах шихтования. Следовательно, необходимо установить зависимость качества окатышей от содержания флюсов и режима обжига. Подобная информация даст возможность моделирования различных вариантов технологии и выбор оптимального сценария ее модернизации.

Целью настоящей работы является установление количественных взаимосвязей содержания MgO , основности $B_2=CaO/SiO_2$ (потребитель, а именно Уральская Сталь использует в расчетах именно этот показатель основности) с прочностью окатышей, произведенных из магнетитового концентрата железистых кварцитов Михайловского месторождения железных руд.

Результаты лабораторных исследований [6] показали, что использование магнезиального флюса (доломита) позволяет улучшить прочность на сжатие окисленных окатышей. Предметом данной статьи является исследование процесса формирования окатышей в полупромышленном масштабе, анализ их металлургических свойств.

Типичный состав доменного шлака при производстве передельного чугуна: CaO ($34\div46$ %), MgO ($6\div12$ %), SiO_2 ($28\div45$ %), Al_2O_3 ($8\div20$ %), другие компоненты (FeO , MnO , K_2O , Na_2O , сульфиды кальция и магния, и др.) в сумме до $3\div5$ %. Большая часть этих соединений поступает в рабочее пространство печи с рудным сырьем (агломерат, окатыши), поэтому состав и свойства шлака определяются именно составом пустой породы железорудных материалов и золой кокса. При использовании железорудного сырья ПАО «МГОК» оптимальное содержание MgO в окатышах составляет $1,5\ldots2,0$ %.

По уровню содержания MgO магнезит имеет явные преимущества как флюс, однако его высокая стоимость и требуемый объем (при условии производства 5 млн. т/год окатышей с содержанием $MgO=1$ % потребление магнезита составит не менее 100 тыс. т/год) ограничивают перспективность его использования. Таким образом, оптимальным магнезиальным флюсом являются доломит либо доломитизированный известняк, запасы которых значительны, а добыча возможна открытым способом с минимальными издержками.

С точки зрения особенностей формирования структуры окатышей влияние доломита проявляется как в изменении тепловых условий обжига (растет эндотермический эффект при разложении карбонатов), так и изменении минерального состава обожженного продукта. Оксид магния, сформированный при декарбонизации доломита, и оксид железа (III) Fe_2O_3 на низкотемпературной стадии обжига окатышей формируют собственную фазу – магнезиевую шпинель с температурой плавления 1750 °C [7-9]. Эта минеральная составляющая не вступает в формирование силикатной связки вплоть до температуры $1250\div1300$ °C и только по достижении этой температуры растворяется в железосиликатном расплаве, формируя шлаковую связку. Это приводит к увеличению времени спекания магнезиальных окатышей. С точки зрения металлургических свойств, MgO способствует увеличению прочности при восстановлении [7], а рост содержания карбонатов в шихте приводит к повышению пористости [10].

Методология и условия проведения исследования. В качестве методологии выбрано физическое моделирование процесса обжига, а именно: формирование представительных проб сырых окатышей массой 15-20 кг, термообработка окатышей в цилиндрическом пробнике на действующей обжиговой машине, определение прочности для трех горизонтов по высоте слоя (верх, середина, низ), Подробности методики полупромышленного обжига в пробниках изложены в работах [11-13].

В качестве исходных материалов использованы железорудный концентрат ПАО «МГОК», известняк, доломит, бентонит. Все шихтовые материалы одновременно отобраны с конвейеров действующего производства. Состав и свойства компонентов шихты приведены в таблице 1.

В исследуемыми факторами являлись основность окатышей $B_2 = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ и содержание MgO . Использовался полный факторный эксперимент первого порядка для двух факторов. ПФЭ 2^2) [14]. Интервал варьирования факторов: $B_2 = 0,5 \div 1,2$ (корректировался добавкой известняка) и $\text{MgO} = 0,5 \div 1,8$ (корректировался добавкой доломита). Кроме этого, дополнительно получены окатыши основностью $B_2 = 0,85$, и $\text{MgO} = 1,25$ %. Термообработка осуществлялась при производительности обжиговой машины 560 т/ч.

Таблица 1

Состав и характеристика компонентов шихты

№	Показатель	Компонент шихты			
		Концентрат	Бентонит	Известняк	Доломит
1	Fe, % масс.	65,4	3,21	0,36	0,33
2	FeO, % масс.	н/д	1,27	0,16	0,06
3	CaO, % масс.	0,20	2,65	52,1	30,00
4	SiO ₂ , % масс.	8,32	60,6	2,15	3,08
5	MgO, % масс.	0,26	2,54	1,35	19,25
6	П.П.П., % масс.	н/д	6,6	42,7	45,6
7	Влажность, % масс.	9,50	9,03	0,17	0,27
8	Удельная поверхность, м ² /кг	144,8	н/д	н/д	н/д
9	Содержание -0,07мм, % масс.	-	>90	>90	>90

В исследуемыми факторами являлись основность окатышей $B_2 = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ и содержание MgO . Использовался полный факторный эксперимент первого порядка для двух факторов. ПФЭ 2^2) [14]. Интервал варьирования факторов: $B_2 = 0,5 \div 1,2$ (корректировался добавкой известняка) и $\text{MgO} = 0,5 \div 1,8$ (корректировался добавкой доломита). Кроме этого, дополнительно получены окатыши основностью $B_2 = 0,85$, и $\text{MgO} = 1,25$ %. Термообработка осуществлялась при производительности обжиговой машины 560 т/ч.

В качестве функций отклика выбрана прочность на сжатие обожженных окатышей. Состав шихты для различных проб приведен в таблице 2. Результаты определений прочности на сжатие, кН/ок представлены в таблице 3.

Таблица 2

Состав шихты опытных проб

№ пробы	В ₂ , ед.	MgO, %	Содержание компонентов, %			
			Концентрат	Бентонит	Известняк	Доломит
1	0,5	0,5	91,60	0,61	7,02	0,76
2	0,5	1,8	88,71	0,61	3,05	7,62
3	1,2	1,8	81,30	0,61	12,30	5,78
4	1,2	0,5	82,33	0,61	16,97	0,08
5	0,85	1,25	85,19	0,61	9,88	4,31

Результаты исследований и их анализ. Определение однородности дисперсий по критерию Кохрена:

$$G_{\text{эксп}} = \frac{S_j^2 \max}{S_{\Sigma}^2} = \frac{0,0834}{0,1939} = 0,430.$$

Для $\alpha=0,05$, $m=m^*-1=3-1=2$ и $n=5$ значение $G_{0,05;2;5}=0,684$. Поскольку $G_{\text{эксп}} < G_{\text{теор}}$, то дисперсии однородны [14].

Уравнение регрессии имеет следующий вид

$$\hat{y} = 2,138 - 0,451X_1 + 0,129X_2 + 0,024 X_1X_2,$$

где X – кодированные безразмерные значения факторов.

$$X_1 = (B_2 - 0,85)/0,35; X_2 = (MgO - 1,15)/0,65.$$

Анализ значимости коэффициентов по критерию Стьюдента показал, что все коэффициенты уравнения регрессии значимы [14].

Расчетные значения прочности приведены в таблице 3. Анализ показал, что уравнение модели по F критерию адекватно, т.к. расчетное значение F критерия 0,071 при допустимом его значении $F_{0,05;1;10}=4,96$ [14].

Из уравнения следует, что области исследуемых факторов наиболее значительным является основность окатышей B_2 . Влияние содержания MgO по сравнению с основностью в $0,451/0,129 = 3,5$ раза меньше. При этом с увеличением основности окатышей их прочность на сжатие падает, а с повышением содержания MgO возрастает. Взаимное влияние указанных параметров значительно меньше по сравнению с действием каждого из факторов в отдельности, что подтверждается относительно малым значением коэффициента 0,024 по сравнению с другими коэффициентами уравнения регрессии.

Зависимость прочности окатышей на сжатие от их основности $B_2=CaO/SiO_2$ при различном содержании MgO представлена на рис. 1, который позволяет определять значения прочности окатышей на сжатие при заданной его основности и содержанию магнезии.

Таблица 3

Результаты исследований прочность окатышей на сжатие при производительности ОМ 560 т/ч

№ пробы	Основность, ед		Содержание MgO, %		Прочность на сжатие, кН/ок	Прочность на сжатие, кН/ок среднее значение	Выборочная дисперсия прочности (кН/ок) ²	Прочность на сжатие, кН/ок среднее значение расчетное
	B ₂ , ед	Кодированное значение B ₂ X ₁	MgO, %	Кодированное значение MgO X ₂				
1.в	0,5	-1	0,5	-1	2,52	2,483	0,0052	2,483
1 с					2,53			
1 н					2,40			
2 в	0,5	-1	1,8	+1	2,87	2,693	0,0834	2,693
2 с					2,85			
2 н					2,36			
3 в	1,2	+1	1,8	+1	1,91	1,840	0,0147	1,840
3 с					1,91			
3 н					1,70			
4 в	1,2	+1	0,5	-1	1,72	1,533	0,0486	1,533
4 с					1,59			
4 н					1,29			
5 в	0,85	0	1,25	0,154	1,75	1,953	0,0420	2,157
5 с					1,95			
5 н					2,16			

в – верх слоя, с – середина слоя, н – низ слоя

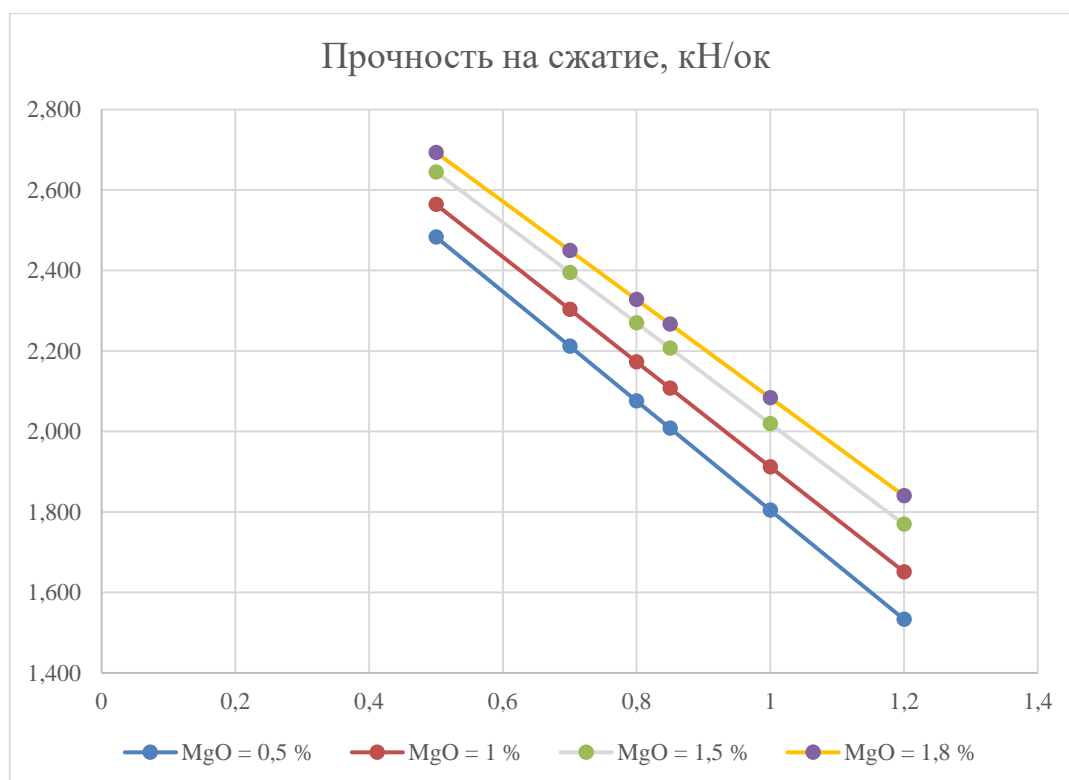


Рис. 1. Зависимость прочности окатышей на сжатие от их основности $B_2 = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ при различном содержании MgO

Выводы

1. С повышением основности $B_2 = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ в диапазоне от 0,5 до 1,2 прочность обожжённых окатышей на сжатие снижается.
2. Использование доломита при содержании $\text{MgO} = 0,5 \div 1,8$ в обожженных окатышах позволяет улучшить прочность окатышей.
3. Наиболее заметное улучшение качества окатышей при использовании доломита наблюдается при основности менее 0,85.

Список использованных источников

1. Некоторые особенности технологии доменной плавки с низким выходом шлака / Е.Н. Виноградов, А.А. Калько, Е.А. Волков, А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча // *Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков.* – М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. С. 51-58.
2. Современный доменный процесс. Введение / М. Геедерс, Р. Ченьо, И. Курунов, О. Лингарди, Д. Риккетс. – М.: Металлургиздат, 2016. – 280 с.
3. Экспериментальное исследование спекания магнезиальных агломератов с использованием флюса на основе силиката магния / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, Н.А. Майстренко, И.С. Берсенев // *Сталь.* 2018. №1. С. 2-5.
4. Модернизация производства АО «Уральская Сталь» как часть стратегии развития холдинга «МЕТАЛЛОИНВЕСТ» / Н.К. Анисимов, М.Н. Нафталя,

Е.В. Маслов, Д.Л. Бурцев, А.А. Солодухин, И.С. Берсенева // *Металлург*. 2016. №7. С. 4-6.

5. Новые условия формирования российского рынка металлов / И.А. Буданов // *Сталь*. 2018. №8. С. 64-72.

6. Влияние основности и содержания оксида магния на качество окатышей из железистых кварцитов / И.С. Берсенева, Е.С. Берсенева, В.В. Брагин, А.Ю. Колясников, А.Ю. Петрышев, А.Ю. Поколенко, А.И. Панченко, С.П. Пигарев // Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ». – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2018. С. 168-172.

7. Окатыши из концентратов железистых кварцитов / Ф.М. Журавлев, Т.Я. Малышева. – М.: Металлургия, 1991. – 127 с.

8. Петрография и минералогия железорудного сырья: учебное пособие для вузов / Т.Я. Малышева, О.А. Долицкая. – М.: МИСиС, 2004. – 424 с.

9. Роль оксида магния в формировании физико-химических и металлургических свойств железорудных окатышей / А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко, А.А. Кожухов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 5. С. 23-28.

10. Обжиговая машина нового поколения – инструмент клиентоориентированного производства окатышей / С.И. Кретов, А.В. Козуб, С.П. Пигарев, В.В. Брагин, А.И. Груздев, А.В. Варичев, А.А. Угаров, А.Л. Кузнецов, А.А. Лавриненко // *Сталь*. 2017. №12. С. 13-18.

11. Исследование спекания железорудных окатышей из концентрата месторождения "Быстринское" / И.С. Берсенева, Е.С. Берсенева, В.А. Горбачев, А.И. Груздев, В.А. Никитин, А.Н. Постолатьев // *Сталь*. 2014. №8. С. 12-13.

12. Совершенствование производства железорудных окатышей на комбинате Лебединского ГОКа / А.А. Угаров, В.Н. Мартинсон, С.Н. Евстюгин, А.А. Солодухин // *Горный журнал*. 2017. №5. С. 32-35.

13. Применение бентонита нового участка Даш-Салахлинского месторождения в производстве железорудных окатышей / Б.Г. Виничук, Д.Ю. Усольцев, Л.И. Воеводин, А.П. Катаев, И.Г. Бормотова, Н.Н. Путалов // *Сталь*. 2008. №3. С. 19-21.

14. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурыкин. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 284 с.